考虑气隙对矩形通道鼓泡工况流动传热行为的研究

刘传栋 许巍 何辉 刘晓晶
（上海交通大学核科学与工程学院 上海 200240）

摘要 研究针对核反应堆板状燃料组件出现的鼓泡现象，利用 Fluent 软件进行了数值模拟研究，并对比了裂变气体鼓泡和以往研究中固体鼓泡的区别。研究发现：气体鼓泡会导致局部温度升高，鼓泡周围热通量密度提高 3 倍，但燃料板整体热通量变化较小；鼓泡的形成会使鼓泡局部换热能力提高约 10%，鼓泡侧热通量提高 4%左右；在高流速条件下，鼓泡的存在会导致燃料板两侧流体产生较大的压力差，使得燃料板发生变形，甚至堵塞流道。研究结果为板状燃料元件设计和安全评估提供了重要参考。

关键词：板状燃料，气隙鼓泡，流动传热特性，矩形通道
中图分类号：TL331

Study on the effect of air gap on the flow and heat transfer behavior in rectangular channel during bubbling conditions

LIU Chuandong XU Wei HU Hui LIU Xiaojing
(Nuclear Science and Engineering School, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract **[Background]** This study focuses on the phenomenon of bubbling in plate-type fuel assemblies within nuclear reactors. The study uses Fluent software for numerical simulation research and compares the differences between fission gas bubbles and solid bubbles, which have been previously studied. **[Purpose]** The purpose of the study is to investigate the effects of bubbling on temperature distribution, heat flux, and heat transfer capability in plate-type fuel assemblies. **[Methods]**The study employs Fluent software for numerical simulation to analyze the effects of both fission gas bubbles and solid bubbles on the thermal-hydraulic characteristics of plate-type fuel assemblies. **[Results]** The findings reveal that gas bubbles cause a local increase in temperature, with the heat flux around the bubbles tripling, though the overall heat flux of the fuel plate remains largely unchanged. The formation of bubbles locally enhances heat transfer capability by approximately 10%, with a 4% increase in heat flux on the bubble side. Under conditions of high flow rates, the presence of bubbles leads to a significant pressure difference across the fuel plate, causing deformation of the fuel plate and potentially leading to the blockage of the flow channel. **[Conclusions]** These discoveries provide significant references for the design and safety assessment of nuclear fuel plates, highlighting the importance of considering the effects of gas bubbling on thermal-hydraulic characteristics in the design and operation of nuclear reactors.

Keywords: Plate fuel, Bubbling, Heat transfer characteristics, Rectangular channel

在核反应堆中，燃料组件是产生热量和保持链式裂变反应的关键部分。板状燃料组件，相较于棒状的燃料组件，展现出更为突出的特性：其燃料温度较低，从而增强了燃料组件的安全性；拥有更大的散热面积，这有助于提高活性区域的功率密度。这些优点使得板状燃料组件在研究型实验堆、舰船用反应堆以及小型动力堆中得到了广泛应用[1]。

国家自然科学基金青年基金(No.12005133)资助
作者简介：刘传栋，男，2001 年出生，2023 年毕业于华北电力大学，现为硕士研究生，从事矩形通道传热研究
通信作者：刘晓晶，E-mail: xiaojingliu@sjtu.edu.cn
Supported by Youth Fund of the National Natural Science Foundation of China(No.12005133)
First author: Chuandong Liu(2001-), male, graduated from North China Electric Power University in 2023, master student, focusing on reactor thermal-hydraulic research
Corresponding author: LIU Xiaojing, E-mail: xiaojingliu@sjtu.edu.cn

板式燃料组件的冷却剂通道构成了封闭的平行流道，这些通道具有极小的间隙，通常仅有几毫米宽。在这些狭窄的冷却液流道中，即使是微小的几何形状变化也能显著影响燃料板的温度分布和质量流量的均衡，进而可能引发燃料板的破裂，甚至导致整个堆芯的损坏。板式燃料元件因其独特的结构而展现出特有的失效模式，即鼓泡现象。在遇到运行中的瞬态变化或轻微事故时，燃料温度可能会暂时性地超过临界阈值，从而在燃料板上形成鼓泡。这种鼓泡的形成是由辐射和热效应的复合作用所致，当燃料板长时间受辐射照射时，会释放出大量的裂变气体，这些气体在局部聚集，导致包壳产生鼓泡。

对于分散燃料而言，燃料颗粒与金属基体之间，以及燃料板与包壳之间的相互作用被认为是鼓泡形成的主要原因。早期对铀钼分散燃料和后来对硅包覆燃料的试验表明，抑制颗粒-基质相互作用可以明显降低燃料在低燃耗时的膨胀；在高燃耗时，燃料颗粒的再结晶会导致其膨胀[2]。对鼓泡区域的检查显示，燃料包壳界面上的氧化物夹杂物与鼓泡发生的位置一致[3]。以上研究共同指出，气态裂变产物的释放是由物质相互作用引起的。另外，额外的温度升高会引起相当大的热应力和气体压力。因此，包层上的某些区域将受到这些影响，并且会发生大的塑性变形，在包壳表面表现为泡状突起[4]。许巍[5]通过实验和数值模拟的方法，研究了在窄矩形通道中由于芯块鼓胀引起的流动堵塞现象。在不同的通道堵塞情况下，研究了流动和传热特性。结果表明，球形鼓胀的存在可以显著改变矩形通道内的对流传热和流动特性。Alshroof 等[6]运用数值模拟研究了窄矩形通道层流状态下球面凹陷和突出的组合效应，得出结论：仅通过单个突出即可获得显着的传热增强，并伴有压降的边际增加。此外，也有其他文献[9,10,11]通过实验来研究突起的影响。

现有研究往往侧重于描述冷却剂和包壳表面的流动再分布、流线以及温度场的改变，而忽略了燃料元件内部结构影响的重要性。此外，许多研究模型中存在一个假设，即认为鼓泡内部是固体，这与实际情况中鼓泡内部充满气体的特性相悖。因此，这些模型未能准确反映燃料元件在实际应用条件下的热工水力行为。

本文基于 Fluent 动网格技术开展了板型燃料元件鼓泡工况下的数值模拟研究，重点关注了气隙鼓泡对板型燃料元件温度场及热通量的具体影响，并且与以往研究中的固体鼓泡做了对比分析。

1 计算模型

几何模型

本研究选取了一块燃料板及其邻近的两个流道作为计算域，具体的几何参数详见表 1。为了确保入口处的流体能够充分发展且减少回流现象，在入口和出口区域分别设定了 70mm 的流动发展段。这一设计有助于提高计算结果的准确性和可靠性，从而更好地模拟实际工作条件下的流体动力学行为。模型整体示意图如图 1 所示（非按比例绘制）。

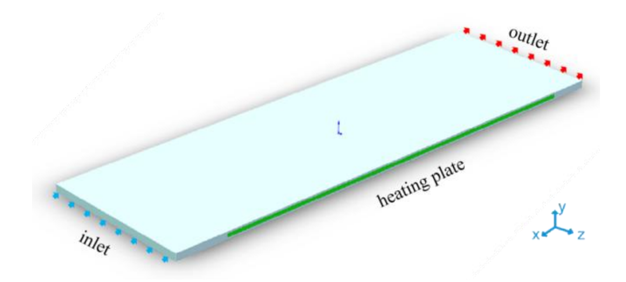


图 1 模型整体示意图

Fig.1 Overall Schematic Diagram of the Model

表 1 模型几何参数

Table 1 Model Geometric Parameters

参数名 Parameter Name	参数值 Parameter Value	参数名 Parameter Name	参数值 Parameter Value
模型长度 Model Length	200mm	流道高度 Channel Height	0.35mm
模型宽度 Model Width	60mm	入口流速 Inlet Velocity	0.5m/s
模型厚度 Model Thickness	1mm	入口温度 Inlet Temperature	289k

为了深入探讨气体鼓泡对燃料板温度分布和热交换效率的影响，并对比传统研究中固体鼓泡的情形，本研究设计了三种不同的实验工况：固体鼓泡、气体鼓泡以及无鼓泡的对照工况。此外，为了简化计算过程，将计算域划分为两个层次：上层板设有内部热源但无鼓泡，代表非鼓泡侧；下层板则存在鼓泡但无内部热源，代表鼓泡侧。鼓泡位置的局部示意图和详细尺寸分别展示在图 2 中以及表 2 中。

为了使气体鼓泡的模拟更加符合实际情况，本研究采用了先进的动网格技术。在模拟过程中，向空腔内注入了具有一定初始压力的氦气，利用气体压力使包壳自然形成鼓泡，从而确保了鼓泡形态与实际情况更为接近。这种方法不仅提高了仿真结果的可信度，也为未来相关研究提供了有力的技术支持。

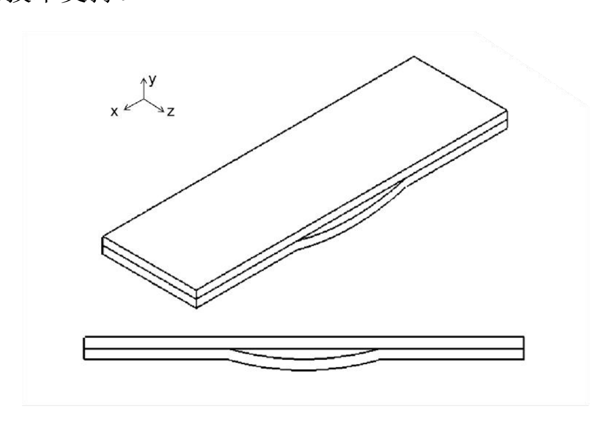


图 2 燃料板鼓泡局部示意图

Fig.2 Schematic Diagram of Fuel Plate Bubbling Locally

表 2 鼓泡尺寸参数及热功率

Table 2 Bubble Size Parameters and Thermal Power

参数名 Parameter Name	鼓泡直径 Bubbling Diameter	鼓泡高度 Bubbling Height	体积释热率 Volume Heat Release Rate
数值 Parameter Value	7 mm	0.175 mm	$4*10^{8}\ W/m^{3}$

CFD 模型

在本研究的 Fluent 软件模拟中，模型的入口边界条件设置为速度入口，出口边界条件设置为压力出口，而模型所有其他表面均指定为壁面边界条件。为了增强压力与速度之间的耦合计算精度，本研究采用了耦合算法（couple 算法）。鉴于本研究流体仅包含单相流体，因此选择了 Realizable k-ε 模型作为湍流模型。该模型由 V.YAKHOT 等人[12]在 1986 年基于 Standard k-ε 模型进行改进，它考虑了旋涡对湍流流动的影响，并为模型中的普朗特数提供了解析表达式，而非经验常数，提高了对旋转流动预测的准确性。

在处理壁面附近的粘性底层区域时，本研究采用了 Scalable 壁面函数。该函数通过壁面 Y+值来评估网格划分的质量，Y+是一个无量纲的壁面距离参数。由于本文模型的 Y+值大约在 10 左右（见图 3），当使用 Standard 壁面函数时，Y+值可能小于 15，这通常会导致计算解的准确性下降。Scalable 壁面函数通过在计算中引入限制，强制 Standard 壁面函数在 Y+值过小时采用对数律，从而保持了计算的准确性。在方程的离散化过程中，能量和动量方程被离散化为二阶迎风格式，而 k 和 ε 方程则采用了一阶迎风格式。

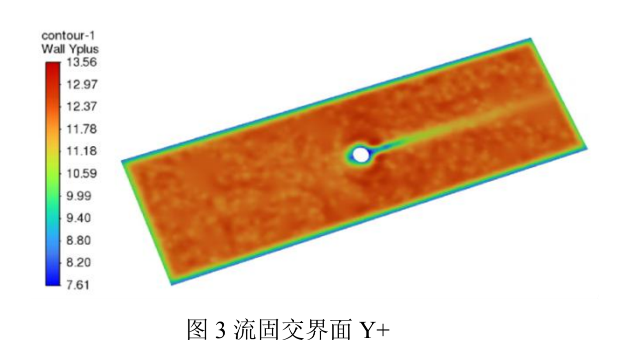


图 3 流固交界面 Y+

Fig.3 Flow-Solid Interface Y+

网格无关性验证

本文通过计算分析验证了网格独立性，选取了通道未发生鼓泡一侧的中心线，并沿流动方向均匀布置了 30 个坐标点，以这些点的温度作为分析参照。进行了四种不同网格数量的划分，具体为：case1（553418 个网格）、case2（1026315 个网格）、case3（2325637 个网格）和 case4（3123546 个网格）。通过对比图 4 中的参数，可以发现 case3 和 case4 的压力曲线已经非常接近，而 case1 和 case2 的曲线与 case4 相比，仍存在显著差异。这表明，当网格数量达到 2325637 时，计算结果已经达到了足够的精确度。因此，为了在确保计算精度的同时兼顾计算效率，本文的模拟采用了 2325637 个网格的划分策略。

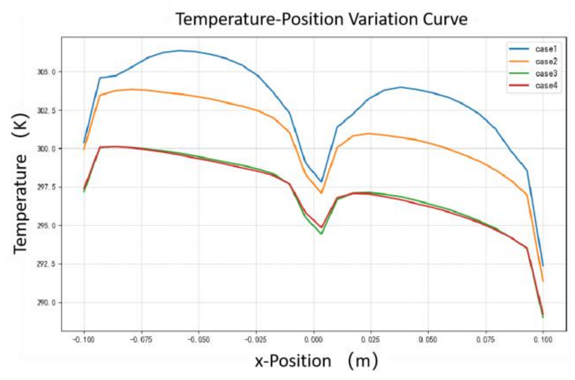


图 4 不同网格数目下燃料板中心线上温度对比

Fig.4 Comparison of Temperature on the Centerline of the Fuel Plate under Different Mesh Numbers

程序验证

本研究采用仿真模拟方法进行了深入探讨，然而在气隙鼓泡方面的分析，由于缺乏直接的实验数据参考，因此无法与实验结果完全吻合。为了确保研究过程的准确性和结果的可信度，本研究选取了一篇相关实验研究文献（即文献[5]）进行对比验证。

在参考文献中的 Table2 实验结果基础上，建立了相应的仿真模型，并严格设置了与文献相同的初始条件和边界条件。通过对比仿真结果与实验数据的一致性，本研究确保了研究的准确性。具体结果详见表 3。本研究以模型出口温度为关键参数，对比了仿真与实验结果的差异，最大相对误差控制在 1%以内，从而验证了本研究所采用仿真方法的精确性。

表 3 仿真与实验结果比较

Table 3 Comparison between Simulation and Experimental Results

Case. No	入口流速 Inlet Velocity/m	入口温度 Inlet Temperature/℃	实验出口温度 Experimental Outlet Temperature/℃	热功率 Heat Power /W	仿真出口温度 Simulated Outlet Temperature/℃	相对误差 Relative Error/%
1	0.10	12.60	24.20	873.47	24.35	0.62
2	0.20	12.60	18.30	858.91	18.36	0.33
3	0.30	15.90	19.80	880.61	19.70	0.51
4	0.40	16.20	19.20	903.16	19.20	0.00
5	0.50	15.80	18.30	940.99	18.31	0.05

2 结果与分析

燃料板温度分布

图 5 展示了三种不同工况下燃料板局部的温度分布云图，由上至下分别是：无鼓泡工况（a）、固体鼓泡工况（b）和气体鼓泡工况（c）。从图中可以明显看出，在气体鼓泡工况下，鼓泡位置出现了其他两种工况所没有的局部高温区域。此外，三种工况下燃料板两侧的流体温度也有所不同，非鼓泡侧的流体温度明显高于鼓泡侧。本文还绘制了含热源板处逆流动方向温度曲线，如图 6 所示。从图中可以看出，在气体鼓泡工况下，燃料板中心位置的温度显著升高，而鼓泡边缘位置温度下降。并且，其局部高温也并没有相比于固体鼓泡差距过大，相对于自身来说，其鼓泡中心温度仍然低于燃料板末端的温度。

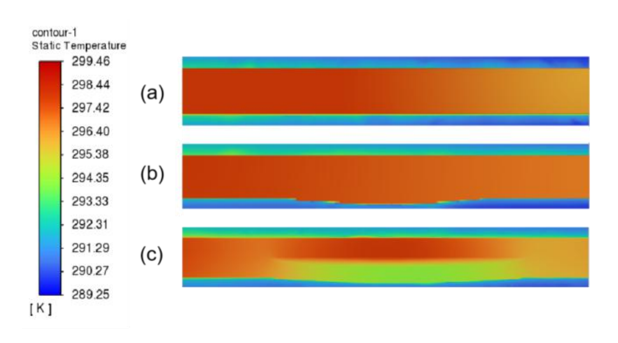


图 5 不同鼓泡工况下燃料板温度云图

Fig.5 Temperature Distribution Maps of Fuel Plates under Different Bubbling Conditions

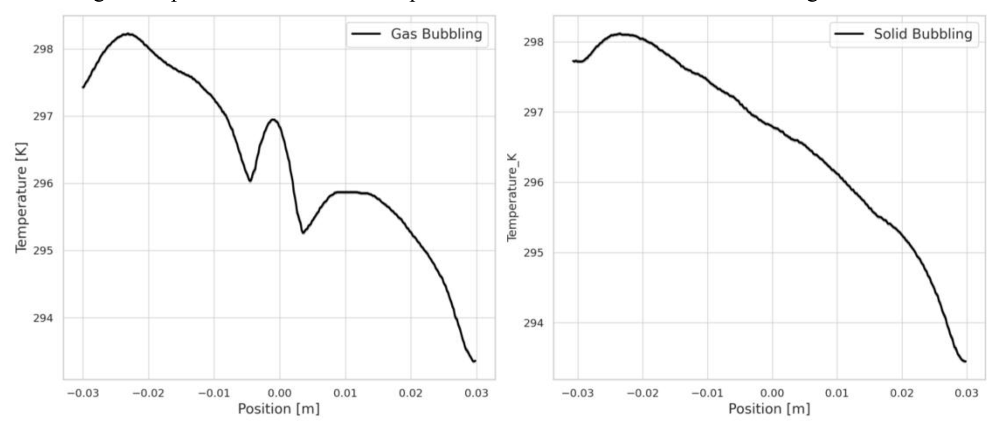


图 6 气体鼓泡（左）与固体鼓泡（右）燃料板流向温度变化曲线

Fig.6 Gas Bubbling (Left) and Solid Bubbling (Right) Fuel Plate Temperature Change Curves Along the Flow Direction

此外，本文对比了过气体鼓泡中心且沿 Y 轴方向直线上的温度分布。如图 7，结果显示：气体鼓泡工况与其他两种工况相比，尽管气隙阻隔了一侧的传热，燃料板的整体温度差异并不显著。只是，与固体鼓泡相比，气体鼓泡工况下的最高温度更靠近鼓泡侧。这是因为在气体鼓泡工况中，大部分热量通过非鼓泡侧传出，这一现象将在下文中进一步讨论和展示。

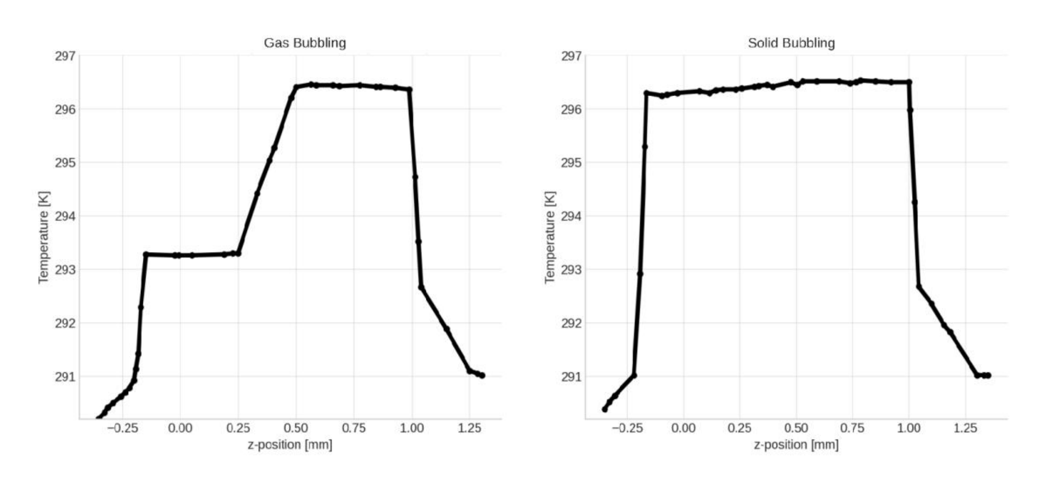


图 7 气体鼓泡（左）与固体鼓泡（右）燃料板纵向温度变化曲线

Fig.7 Gas Bubbling (Left) and Solid Bubbling (Right) Fuel Plate Longitudinal Temperature Variation Curves

热通量分布与表面换热系数

图 8 展示了三种不同工况下燃料板内部的热通量分布图，由上到下依次是：无鼓泡工况（a）、固体鼓泡工况（b）和气体鼓泡工况（c）。观察图中的数据，我们可以发现气体鼓泡处的热通量几乎为零，然而在气体鼓泡周围，特别是在鼓泡侧与非鼓泡侧板的交界处，热通量达到了固体鼓泡同位置的三倍（即图 8-c 圈起处及对称位置）。图 9 进一步展示了沿 Z 轴方向且穿过气体鼓泡中心位置的热通量分布（由左至右对应图 8 由下至上）。从图中可以明显看出，在固体鼓泡工况下，燃料板鼓泡侧的热通量较高，而在气体鼓泡工况下，燃料板非鼓泡侧的热通量更高。然而，两种工况下该位置的总热通量相差不大。

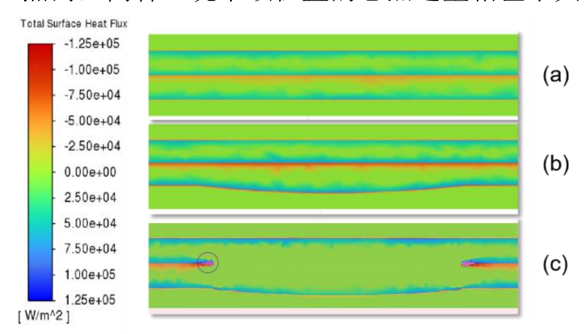


图 8 不同鼓泡工况下燃料板热通量云图

Fig.8 Heat Flux Distribution Maps of Fuel Plates under Different Bubbling Conditions

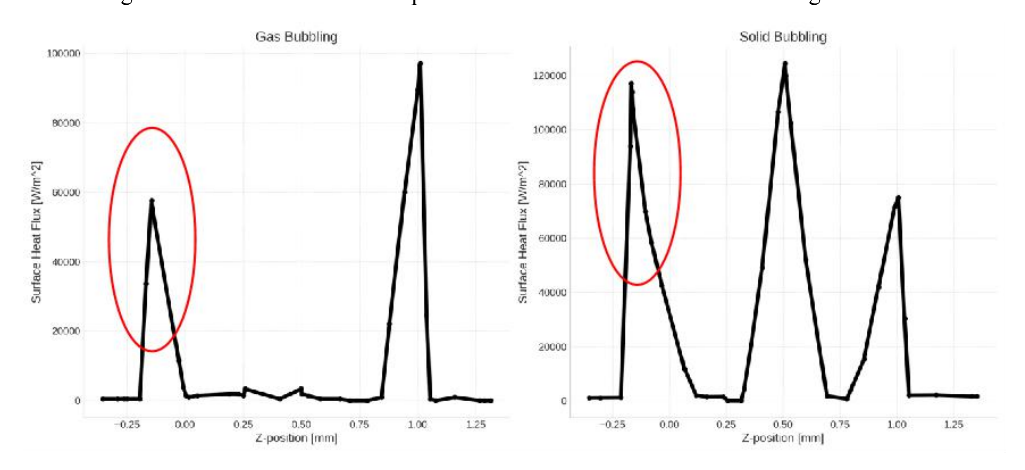


图 9 气体鼓泡（左）与固体鼓泡（右）燃料板鼓泡中心热通量密度变化图

Fig.9 Gas Bubbling (Left) and Solid Bubbling (Right) Fuel Plate Bubble Center Heat Flux Density Variation Graph

图 10 展示了在三种工况下总热通量几乎相同的情况下，鼓泡侧和非鼓泡侧热通量的占比。从图中可以观察到，鼓泡的存在显著增强了鼓泡侧的对流换热，使得热通量高于非鼓泡侧。这一现象可以归因于鼓泡对流体流动的扰动，这种扰动破坏了局部的边界层，从而增强了传热效率。这一发现与郭玖元[7]的研究结论相吻合。此外，在气体鼓泡工况下，尽管鼓泡在一定程度上阻挡了传热，但由于流体扰动的增强作用，鼓泡侧总体换热效率仍然得到了提升。与固体鼓泡侧热通量占据 58%相比，气体鼓泡侧的热通量只提高到 54%左右。

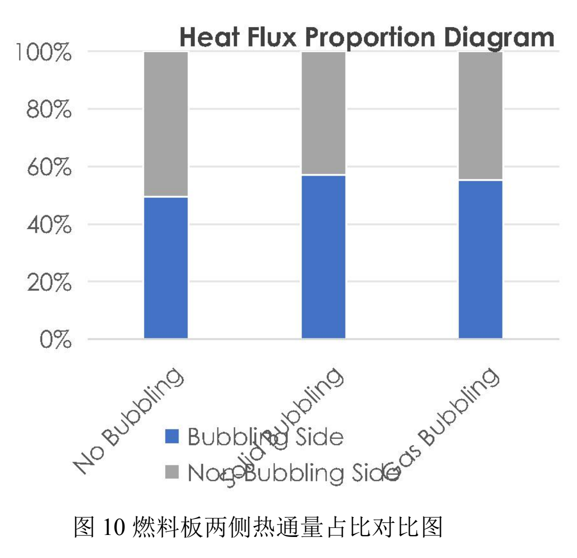


图 10 燃料板两侧热通量占比对比图

Fig.10 Heat Flux Proportion Diagram on Both Sides of the Fuel Plate

本另外文选取了鼓泡中心位置与流体交界面处来计算换热系数。根据表 4 中的数据，可以得出结论，无论是气体鼓泡还是液体鼓泡，它们都导致表面换热系数的增加。具体来说，气体鼓泡使得表面换热系数增加了大约 9%，而固体鼓泡则使得表面换热系数增加了大约 10%。这表明，鼓泡的存在可以有效提高换热效率，且相对于以往研究中的球型鼓泡，气体压力形成的鼓泡带来的换热效率的加强要稍弱一些。

表 4 三种鼓泡工况下燃料板鼓泡中心位置换热系数计算表

Table 4 Table for Heat Transfer Coefficients at the Bubbling Center of the Fuel Plate

单位 Unit	热通量 Heat Flux W/m^2	壁面温度 Wall Temperature K	冷却剂温度 Coolant Temperature K	换热系数 Heat Transfer Coefficient $W/(m^2\cdot K$
无鼓泡 No Bubbling	9.5*10^4	296.2	291.8	2.16*10^4
固体鼓泡 Solid Bubbling	1.2*10^5	296.1	291.0	2.35*10^4
气体鼓泡 Gas Bubbling	5.7*10^4	293.3	290.9	2.38*10^4

燃料板的形变行为

本文进一步探讨了鼓泡燃料板在高速流动条件下的热-力耦合现象。通过采用 ANSYS 的流-固耦合技术，在入口流速高达 10m/s 的条件下，研究了对窄矩形通道中鼓泡对结构受力的影响。研究结果表明，当鼓泡阻塞通道时，周围的流体流动速度显著增加，导致局部压力降低。这种流动效应会引起燃料板发生剧烈变形，严重时可能导致流道完全堵塞。图 11 展示了燃料板的变形情况。在没有设置接触检测的情况下，上层板的尾部出现了明显的凹陷，而鼓泡位置及其后方的下层板部分则出现了向上凸起的现象，两层板之间出现了交叉挤压现象。

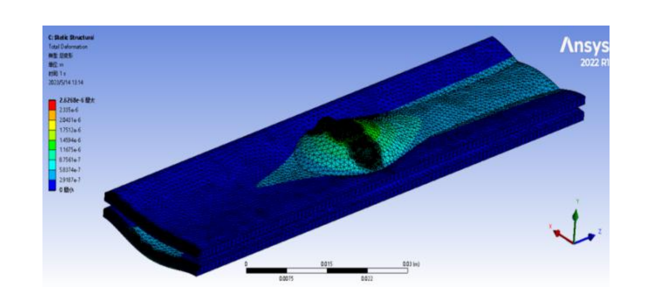


图 11 鼓泡燃料板形变图

Fig.11 Deformation Map of Bubbling Fuel Plate

3 结语

本文基于计算流体力学商业软件 Fluent，通过对比以往研究中的固体鼓泡和实际气体鼓泡燃料板温度场和热通量的对比，分析了气隙对于窄矩形鼓泡通道流动和传热的影响，获得以下结论：

（1）在气体鼓泡工况下，燃料板局部区域的温度显著升高，同时高温点也会更接近鼓泡处。并且气体鼓泡周围的热通量密度是固体鼓泡情况的三倍。

（2）鼓泡的存在导致燃料板局部换热能力增强约 10%，并且，鼓泡的形成使鼓泡侧的热通量提高 4%左右，但要略低于以往研究中固体鼓泡的强化作用。

（3）在高流速条件下，鼓泡的形成可能导致燃料板承受更大的压力差，导致燃料板发生弯曲进而堵塞流道。本研究的发现对于理解鼓泡现象在核燃料板设计和安全评估中的重要性提供了新的视角，对优化燃料板的热工设计和提高核反应堆的安全性具有重要意义。

致谢 感谢“国家自然科学基金青年基金(No.12005133)资助”的基金资助。

作者贡献声明 刘传栋负责仿真模拟、结果分析及论文撰写；许巍负责论文修改和润色；何辉提供资金和设备支持；刘晓晶负责方案设计、论文审阅和修改。

参考文献:

[1] 苏光辉，秋穗正，田文喜. 核动力系统热工水力计算方法[M]. 北京：清华大学出版社，2013.

SU Guanghui, QIU Suizheng, TIAN Wenxi. Nuclear power system thermal-hydraulic calculation method. Beijing: Tsinghua University Press, (2013).

[2] National Academies of Sciences, E., and Medicine, Technical Obstacles to Conversion, in Reducing the Use of Highly Enriched Uranium in Civilian Research Reactors. 2016, The National Academies Press: Washington, DC.

[3] Gerard L., H., Some Recent Observations on the Radiation Behavior of Uranium Silicide Dispersion Fuel, in International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. 1988: San Diego, California.

[4] Li L , Fang D , Zhang D ,et al.Flow and heat transfer characteristics in plate-type fuel channels after formation of blisters on fuel elements[J].Annals of nuclear energy, 2019, 134(Dec.):284-298.DOI:10.1016/j.anucene.2019.06.030.

[5] Xu W, Ouyang K, Guo J, et al. Experimental and numerical investigations on heat transfer and flow behavior of flow blockage in narrow rectangular channel with protrusions[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 203: 117954.

[6] O. Alshroof, J. Reizes, V. Timchenko et al., Flow structure and heat transfer enhancement in laminar flow with protrusion-dimple combinations in a shallow rectangular channel, Heat Transfer Summer Conference 43574 (2009) 785–795.

[7] 郭玖元,邓永皓,许巍,刘晓晶,何晓强.矩形通道局部变形堵塞对流传热实验研究[J].核技术,2021,44(05):78-84.

GUO Jiuyuan, ZHENG Yonghao, XU Wei, LIU Xiaojing, HE Xiaoqiang. Experimental study on convection heat transfer in rectangular channel with partial blockage[J]. Nuclear Techniques,2021,44(05):78-84.

[8] 武振兴. 辐照条件下板状燃料组件三维流固耦合技术研究[D]. 陕西:西安交通大学,2019.

WU Zhenxing. Research on Three-Dimensional Fluid-Solid Coupling Technology for Plate-Type Fuel Assemblies under Irradiation Conditions[D]. Xi’an Jiaotong University (2019). Retrieved from Shaanxi, China.

[9] A.I. Leontiev, N.A. Kiselev, Y.A. Vinogradov, et al., Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces coated with dimples of different shape, Int. J. Therm. Sci. 118 (2017) 152–167.

[10] W. Zhou, Y. Rao, H. Hu, An experimental investigation on the characteristics of turbulent boundary layer flows over a dimpled surface, J. Fluids Eng. 138 (2) (2016).

[11] P. Kumar, A. Kumar, S. Chamoli, et al., Experimental investigation of heat transfer enhancement and fluid flow characteristics in a protruded surface heat exchanger tube, Exp. Therm Fluid Sci. 71 (2016) 42–51.

[12] Yakhot, V., Orszag, S.A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. J Sci Comput 1, 3–51 (1986).

[13] Stovall, T K, Crabtree, J A, Felde, D K, and Park, J E. Flow blockage analysis for the advanced neutron source reactor. United States: N. p., 1996. Web.

[14] 宋磊，郭赟，曾和义．板状燃料组件入口堵流事故下流场和温度场的瞬态数值计算[J]．核动力工程，2014, 35(3): 6-10.

SONG Lei, GUO Yun, ZENG Heyi. Numerical analysis on transient flow and temperature field during inlet f low blockage accidents of plate-type fuel assembly[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(3): 6–10.